ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1974

Seria: Elektryka z. 46 Nr kol. 427

Zbigniew Fidrych

Instytut Transportu i Komunikacji

CZĘSTOTLIWOŚĆ I SZYBKOŚĆ ROZCHODZENIA SIĘ DRGAŃ W SIECI TRAKCYJNEJ

Streszczenie. Drgania sieci trakcyjnej przeanalizowano metodą nagłego zdjęcia obciążenia oraz metodą rezonansu drgań uzyskanego przy użyciu specjalnie zaprojektowanego generatora drgań.

Druga z tych metod pozwoliła na uzyskanie pełniejszej charakterystyki częstotliwości drgań sieci. Uzyskane wyniki pomiarów rozchodzenia się drgań w sieciach z elastycznym rozwiązaniem strefy konstrukcji wsporczej okazały się niższe od dotychczas uzyskiwanych dla sieci bez takiego rozwiązania i od postulowanych w oparciu o przesłanki teoretyczne.

Częstotliwość drgań własnych sieci trakcyjnej oraz ich przenoszenie wzdłuż przelotu stanowi jeden z ważniejszych parametrów. Zachowanie się systemu sieci podczas drgań charakteryzuje jego "dynamiczną indywidualność", która z kolei określa jego zachowanie się w różnych warunkach współpracy z innym systemem, jakim jest jeden lub kilka współpracujących z siecią odbieraków prądu.

Pod wpływem impulsu, takiego jak na przykład nagłe zdjęcie obciążenia zawieszonego na przewodzie jezdnym przeważnie w środku przelotu, sieć zostaje wyprowadzona z położenia równowagi i zaczyna wykonywać drgania własne, zwane inaczej swobodnymi.

Powstanie drgań i ich kontynuacja spowodowana jest tym, że sieć trakcyjna podobnie jak wahadło posiada dwie właściwości:

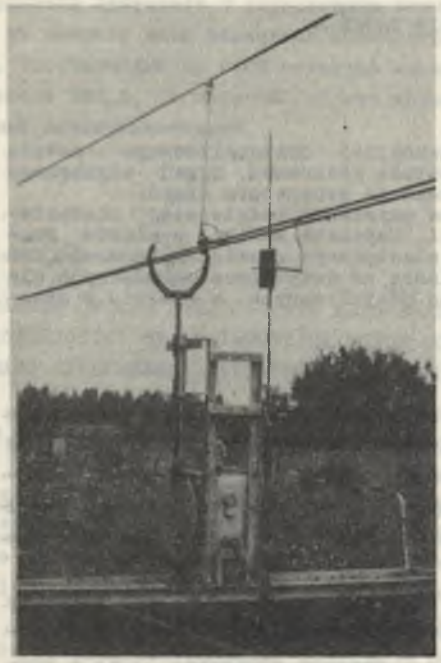
- po pierwsze, sieć posiada masę i podczas ruchu może nagromadzać energię kinetyczną,
- po drugie, posiada zdolność nagromadzania energii potencjalnej, przy wychyleniu od położenia równowagi.

Obserwacje drgań sieci wywołanych w opisanym powyżej przypadku pozwalają na sformułowanie następujących spostrzeżeń:

1. Rozwój ruchu sieci w czasie, zależy od sposobu jego inicjacji.
2. Ruch ulega tłumieniu w czasie i stopniowo wygasa.
3. Ruch sieci trakcyjnej w płaszczyźnie pionowej nie posiada jakiejś określonej formy, ulega zmianom w czasie i w końcowej fazie przybiera mniej lub bardziej wyraźny charakter zbliżony do harmonicznego.

4. Trudno wyznaczyć częstotliwość drgań (jednakże z upływem czasu drgania mogą przyjąć określoną częstotliwość).

Dlatego też drgania sieci wywołane przez wyprowadzenie układu z położenia równowagi w sposób najczęściej stosowany, tj. przez nagłe zdjęcie obciążenia 20-30 kg masy - bywają chaotyczne.



Rys. 1. Generator drgań

Jeżeli odpowiednio dobierzemy początkowe warunki ruchu, to możliwe będzie uporządkowanie jego charakteru. Uporządkowanie takie polega na doprowadzeniu do harmonicznego ruchu sieci o stałej formie i stałej częstotliwości.

W przeprowadzonym eksperymencie na poligonie doświadczalnym w Częstochowie, takie uporządkowanie osiągnięto w sposób następujący:

W środku przelotu do przewodów jezdnych podłączono generator drgań (rys. 1). Przy pomocy tego generatora punkt styku przewodów jezdnych z uchwytem generatora przemieszczał się w kierunku pionowym, wymuszając na sieci drgania harmoniczne pod wpływem okresowej siły zewnętrznej

$$F = F_o \sin\omega t$$

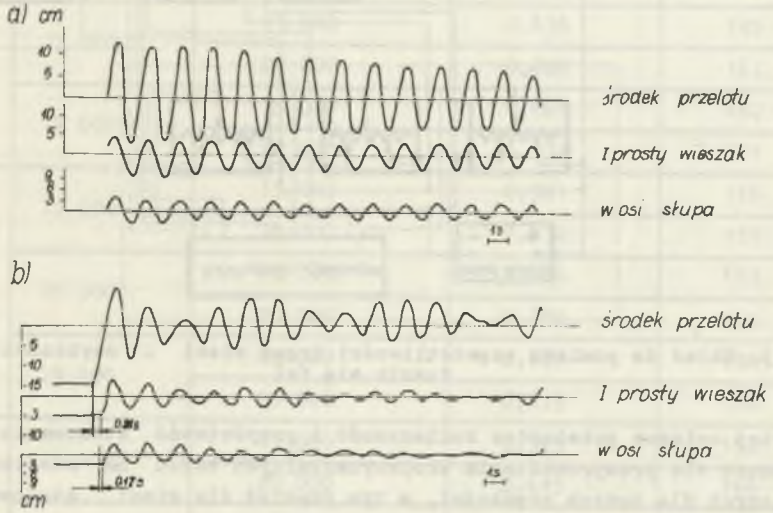
Stopniowe regulowanie obrotów silnika wprowadzającego mechanizm generatora w ruch pionowy, zmieni częstotliwość kątową ω i tym samym częstotliwość drgań harmonicznych punktu styku. Przy wzroście częstotliwości dochodzimy do momentu, gdy sieć trakcyjna zacznie intensywnie drgać z częstotliwością równą częstotliwości drgań wymuszanych. W tej sytuacji następuje zjawisko rezonansu.

Jeśli nagle, nie wywołując zakłóceń ruchu, odłączymy generator drgań od przewodu jezdnego - to dalszy ruch harmoniczny sieci będzie odmienny od tego, jaki obserwujemy w przypadku drgań wywołanych przez zdjęcie ciężaru (rys. 2).

System sieci trakcyjnej charakteryzujący się nieskończoną ilością stopni swobody, wyprowadzony z położenia równowagi - wykonuje drgania złożone.

Najbardziej istotna jest analiza harmoniczna drgania polegająca głównie na badaniu pierwszej harmonicznej.

Określenie liczbowej wartości podstawowej harmonicznej jest ważne, ponieważ posiada ona istotny wpływ na wielkość amplitudy drgań sieci trakcyjnej, a ponadto przemieszczający się z dużą szybkością wzdłuż sieci odbierak prądu, wywołuje w niej drgania wymuszone z częstotliwością bliską pierwszej harmonicznej.



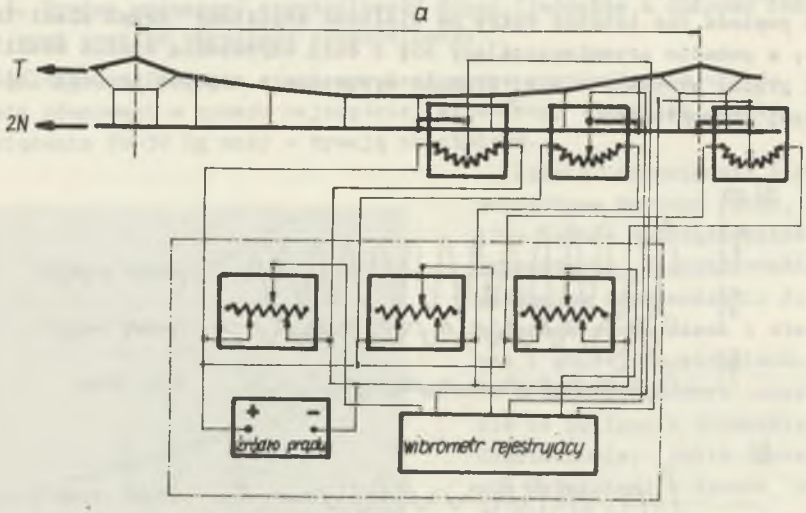
Rys. 2. Oscylogramy swobodnych drgań sieci trakcyjnej dla przęsła L = 70 m z naciągami; T = 12000 N, 2 N = 15000 N
a) uzyskana metodą rezonansu, b) zdjęciem obciążenia 27 kg masy

Na rys. 2a przedstawiono oscylogram przebiegów w czasie przejścia z drgań wymuszonych na drgania swobodne.

Rejestru drgań dokonano przy pomocy specjalnego układu do pomiaru częstotliwości i szybkości rozchodzenia się fal; - w środku przelotu, przy pierwszym prostym wieszaku od strony konstrukcji wsporczej i w miejscu zamocowania przewodów do ramion odciągowych (rys. 3).

Analizując przebieg zarejestrowanych drgań, stwierdzić można ich stopniowe zanikanie (amplituda maleje, i wreszcie układ przechodzi w stan spoczynku). Dzieje się to dlatego, że podczas drgań sieci energia nie tylko przechodzi z jednej mechanicznej formy na drugą (z potencjalnej w kinetyczną i odwrotnie), ale zostaje rozchodowana na tworzenie się plastycznych deformacji i w związku z istnieniem w systemie oporów przekształca się w inne formy energii - cieplną, dźwiękową itp.

Dokładna analiza drgań zanikających przydatna jest dla określenia logarytmicznego dekrymentu tłumienia [1], w celu obliczenia wielkości oporów w sieci proporcjonalnych do amplitudy i prędkości.



Rys. 3. Układ do pomiaru częstotliwości drgań sieci i szybkości rozchodzenia się fal

Wyżej opisane potwierdza konieczność i przydatność stosowania metody rezonansu dla przeprowadzenia eksperymentalnych badań na sieciach przeznaczonych dla dużych prędkości, w tym również dla sieci stosowanych w PKP.

Częstotliwość swobodnych drgań sieci trakcyjnej, przyjęta przez różnych autorów [2], [3], [4], jako częstotliwość pierwszej harmonicznej, może być przedstawiona zależnością:

$$f = \frac{\alpha}{L}\sqrt{\frac{T + 2N}{g}} \left[\frac{1}{s}\right]$$

gdzie:

L - długość przęsła w metrach,

T i 2 N - naciągi (odpowiednio - linki nośnej i przewodów jezdnych w N),

α - współczynnik przyjmowany w granicach od 0,435 do 0,5,

g - ciężar 1 mb sieci.

Przeprowadzone badania eksperymentalne na sieciach trakcyjnych, stosowanych w PKP przy zmianie parametrów, L - od 65 do 75 m, T od 12000 do 18000 N i 2 N 15000 i 20000 N (rozpatrywano dwa przewody jezdne) - wskazują, że dla badanych sieci z dokładnością do 4%, można przyjmować współczynnik $\alpha = 0,435$.

Wyniki pomiarów częstotliwości swobodnych drgań sieci trakcyjnych ilustruje tablica 1.

Tablica 1

Długość przęsła w m	Siła naciągu linki nośnej T N	Siła naciągu przewodów jezdnych 2N N	Częstotliwość swobodnych drgań f 1/s	Prędkość krytyczna km/godz
65	12 000	15 000	0,628	147
		20 000	0,665	155
	15 000	15 000	0,636	149
		20 000	0,688	161
	18 000	15 000	0,686	160
		20 000	0,732	171
70	12 000	15 000	0,581	146
		20 000	0,630	159
	15 000	15 000	0,606	153
		20 000	0,650	164
	18 000	15 000	0,627	158
		20 000	0,675	170
75	12 000	15 000	0,565	152
		20 000	0,615	166
	15 000	15 000	0,584	158
		20 000	0,636	172
	18 000	15 000	0,625	169
		20 000	0,670	181

Dokładna znajomość liczbowej wartości częstotliwości sieci pozwala na obliczenia prędkości, przy której może wystąpić niezadowalająca współpraca sieci z odbierakiem prądu. Wartość tej prędkości zwana krytyczną wyznacza moment zrównania się częstotliwości drgań siły wymuszającej wywoływanej przez odbierak prądu z częstotliwością drgania sieci.

Odbierak prądu przechodząc wzdłuż przęsła doznaje pionowych przemieszczeń na skutek nierównomiernej elastyczności sieci. Pokonywanie kolejnych przęseł wymusza na odbieraku prądu kontynuowanie drgań z częstotliwością wprost proporcjonalną do realizowanej prędkości i odwrotnie, do długości przęsła.

Zachodzące zjawisko posiada cechę wzajemnego oddziaływania obydwu systemów dynamicznych w efekcie czego, następuje wzrost amplitudy drgań i znaczne pogorszenie współpracy sieci z odbierakiem prądu.

Realizowanie prędkości większych od krytycznych, podanych w tablicy 1, jest podyktowane ogólną tendencją zwiększania prędkości do 200 i więcej

km/godz. Jednakże wymaga to bardzo wnikliwych studiów nad właściwościami dynamicznymi obydwu systemów. Rezultatem tego jest pojawienie się coraz to nowych rozwiązań konstrukcyjnych, zarówno dla sieci trakcyjnej jak również i odbieraków prądu. Należy zwrócić uwagę na fakt, że ze względów ekonomicznych większą uwagę w chwili obecnej zwraca się na modernizację samego odbieraka prądu. Przytoczone problemy jeszcze raz potwierdzają konieczność dokładnej znajomości, podatności systemu sieci trakcyjnej na drgania oraz słuszność przyjętej metody dla określenia ich wielkości.

Metoda nagłego zdjęcia obciążenia z przewodu jezdnego stosowana dotychczas dla rejestrowania częstotliwości drgań sieci nie pozwala na otrzymanie dokładnego i jednoznacznego wyniku, co potwierdza oscylogram - rys. 2b. Metoda ta może natomiast być wykorzystana dla pomiaru rozchodzenia się drgań w sieci. Jest to istotny parametr umożliwiający znalezienie różnicy w prędkości, z jaką drganie sieci wyprzedza szybko przemieszczający się w tym samym kierunku odbierak prądu. Zrównanie się tych prędkości następuje podczas uzyskania przez odbierak prądu prędkości liniowej rzędu 110 m/s i uważane jest przez wielu naukowców za prędkość graniczną, wyżej której przy obecnej konstrukcji sieci i odbieraka prądu - współpraca będzie niemożliwa. Jednakże stwierdzenie to do chwili obecnej jest pozbawione podstaw teoretycznych i praktycznych.

Szybkość rozchodzenia się drgań w sieci V_p wzdłuż odcinka naprężenia jest obliczana ze wzoru:

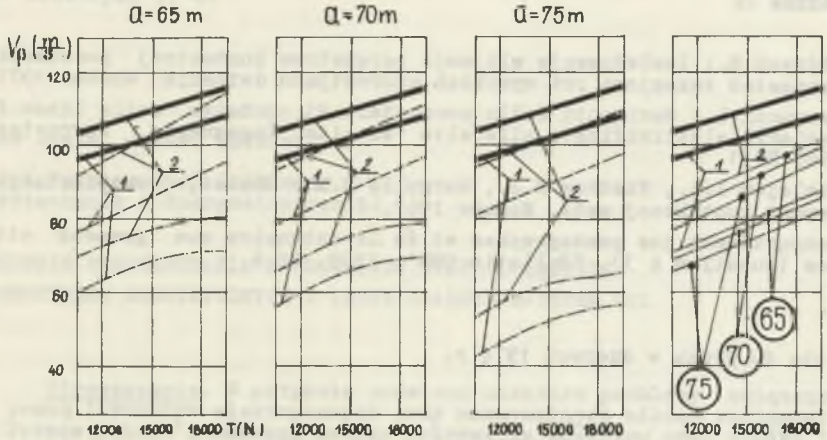
$$V_p = 3{,}6\sqrt{\frac{T + 2N}{g}} \left[\frac{km}{godz}\right]$$

Za podstawę do opracowania powyższej zależności posłużyły dane eksperymentalne otrzymane z badań sieci łańcuchowej pojedynczej z wieszakami prostymi o długości przęsła nie przekraczającej 60 m. Jednakże w ostatnich latach, w sieciach trakcyjnych przeznaczonych dla dużych prędkości, dokonano zasadniczych zmian w strefie konstrukcji wsporczej, polegających na uelastycznieniu węzła mocującego przewody jezdne.

Dokonano tego przy pomocy podwieszenia przewodów jezdnych do linki resorowej zwanej zawieszeniem typu Y, zawieszanej przeważnie symetrycznie w stosunku do osi słupa, na długości od 8-20 m. (Poprzednio w poddawanych badaniom sieciach, przewody były bezpośrednio podwieszane do linki nośnej).

Do chwili obecnej nie prowadzono badań szybkości rozchodzenia się drgań dla wymienionego typu sieci, wobec czego znajomość parametru V_p dla sieci z elastycznym zawieszeniem Y, z uwzględnieniem różnych długości przelotów, może być przydatna dla wytycznych przy projektowaniu sieci szybkich.

Wyniki przeprowadzonego eksperymentu ilustruje rys. 4. Grubymi liniami ciągłymi wykreślono rezultaty obliczeń otrzymanych przez podstawienie do



Rys. 4. Zależność szybkości rozchodzenia się fal od naciągów w lince nośnej i przewodach jezdnych

krzywe 1 - 2N = 15000 N krzywe 2 - 2N = 20000 N

wzoru, na V_p liczbowych wartości przyjmowanych podczas eksperymentu parametrów. Pozostałe krzywe ilustrują prędkości rozchodzenia się drgań na odcinku - od środka przęsła, do pierwszego prostego wieszaka (linia przerywana) i od pierwszego wieszaka do osi konstrukcji wsporczej (linia punktowana).

Analizując otrzymane eksperymentalne krzywe na odcinku - środek przelotu - pierwszy wieszak, stwierdzić można stosunkowo nieduże rozbieżności między prędkością V_p obliczeniową i eksperymentalną, przy naciągu w przewodach jezdnych 2N = 20000 N.

Większa rozbieżność w granicach średnio 15% istnieje na tym samym odcinku przy naciągu zmniejszonym do 2 N = 15000 N.

Do znacznego zmniejszenia szybkości V_p na odcinku prosty wieszak oś słupa, przyczynia się elastyczna strefa konstrukcji wsporczej oraz uwidacznia się wpływ długości przęsła. Średnia szybkość rozchodzenia się drgań w sieciach z zawieszeniem Y jest mniejsza od dotychczas panującego na ten temat przekonania.

Z wykresu zestawieniowego przedstawionego na rys. 4 wynika, że znacznie większy wpływ niż to uwzględniono we wzorze na V_p, okazuje naciąg w przewodach jezdnych i zrównanie się prędkości odbieraka prądu z prędkością fali podłużnej nastąpi w przybliżeniu przy prędkościach; 75 m/s - w sieciach z naciągami T = 15000 N, 2 N = 15000 N, i 90 m/s - w sieciach z naciągami T = 15000 N i 2 N = 20000 N.

Oddziaływanie długości przęsła na średnią szybkość rozchodzenia się drgań jest nieznaczne i znajduje się w granicach około 5%.

LITERATURA

[1] Fidrych Z.: Issledowanje wlijanja parametrow kontaktnoj podwieski na kaczestwo tokosjoma pri wysokich skorostjach dwiżenja. Moskwa 1971.

[2] Pascucci L.: Movimenti delle conduttere di contatte delle linee ferrevierie elettirificate alle alte velocita. Ingegneria Ferroviaria. 1967 Nr 1.

[3] Bielajew I.A., Wietrow N.I., Morgolis S.M.: Montaż, ekspluatacja i remont kontaktnoj seti. Moskwa 1967.

[4] Comportement des pantographes et de la catenaire aux grandes vitesses (Question A 3). "Bulletin ORE", 1958, Nr 6.

Przyjęto do druku w czerwcu 1974 r.

ЧАСТОТА И СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН
В КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Р е з ю м е

Проведен анализ колебаний в контактной сети методом мгновенного снятия нагрузки и методом резонанса колебаний путем использования для этой цели специально сконструированного генератора колебаний.

Второй из этих методов позволил на получение полной характеристики частоты колебаний контактной сети. Полученные результаты измерений скорости распространения волн в контактной сети с рессорной струной ниже, чем для сети, в которой отсутствует эластичный элемент опорного узла, и тем самым меньше от теоретически определенных значений.

FREQUENCY AND VELOCITY OF PROPAGATION
OF WAVES IN A CONTACT LINE

S u m m a r y

Specific oscillations of a contact line were analysed by means of commonly applied method of sudden removal of load and by the method of bringing the contact line oscillations to resonance by means of an especially designed oscillator. The latter method made it possible to achieve precise frequency characteristics of contact line oscillations. Obtained results of measurements of the wave propagation in an overhead lines with elastictype support appeared to be lower than both those found for overhead lines without such support and those postulated basing on theoretical premises.